

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 621.317.75 : 681.335.2

А. М. БАТРАКОВ, В. Р. КОЗАК, Э. А. КУПЕР, А. В. НИФОНТОВ
(Новосибирск)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕГИСТРАТОРОВ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Большинство современных крупных физических установок работает в импульсном режиме. При этом значительный объем информации несут быстроменяющиеся сигналы. Знание формы этих сигналов, т. е. поведения измеряемой величины во времени, имеет зачастую принципиальное значение. Создание и широкое внедрение в практику физических исследований аппаратуры и автоматизированных систем для регистрации формы однократных сигналов позволяют реализовать ряд новых методов, достичь лучших количественных оценок процессов и создать качественно новые предпосылки к комплексной автоматизации эксперимента.

В ИЯФ СО АН СССР создана и широко используется разветвленная номенклатура приборов для регистрации формы однократных импульсных сигналов. Эти приборы можно разбить на два типа: регистраторы, работающие в реальном времени, т. е. осуществляющие преобразование в код и запоминание отсчетов в темпе поступления сигнала, регистраторы, преобразующие сигнал в код с изменением временного масштаба.

Для обработки сигналов в наносекундном диапазоне чаще всего применяются приборы второго типа [1—6].

В тех случаях, когда работа ведется с сигналами длительностью от нескольких десятков наносекунд и более, целесообразно использование аппаратуры реального времени. Работы по созданию этого класса приборов были начаты в ИЯФ СО АН СССР в 1973 г. Первая регистрирующая система [7] позволяла осуществлять 8-битовое кодирование сигнала при интервале дискретизации 50 нс. Входящий в состав системы быстродействующий коммутатор давал возможность одновременно регистрировать сигналы по восьми каналам. Емкость оперативного запоминающего устройства для каждого из каналов составляла 512 слов.

Дальнейшее развитие работ привело к созданию в стандарте КАМАК серии приборов для регистрации формы однократных сигналов [8]. Некоторые из этих приборов [9—11] начиная с 1978 г. и до недавнего времени изготавливались в ИЯФ СО АН СССР. Приборы широко применяются на различных экспериментальных установках как в ИЯФ СО АН СССР, так и в различных научно-исследовательских организациях страны.

Прогресс в области создания интегральных схем аналого-цифровых преобразователей и микросхем памяти инициировал разработку нового поколения регистраторов формы — унифицированного ряда приборов с улучшенными метрологическими характеристиками и большими функциональными возможностями [12, 13]. Параметры новой серии приборов приведены в табл. 1.

Принцип действия приборов показан на структурной схеме, состоящей из трех основных узлов: аналого-цифрового преобразователя, коди-

Таблица 1

Параметр	Тип прибора		
	АЦП-710S	АЦП-850S	АЦП-101S
Разрешающая способность	7 бит	8 бит	10 бит
Интервалы между отсчетами	10 нс—1 мкс	50 нс—2 мс	1 мкс—2 мс
Объем памяти	256 слов	1024 слова	4096 слов
Диапазоны входных сигналов	± 160 мВ— ± 10 В	± 80 мВ— ± 10 В	± 80 мВ— ± 10 В
Полоса частот	40 МГц	4 МГц	400 кГц

рующего сигнал; оперативной памяти, в которой запоминаются результаты отсчетов по мере их поступления; интерфейса для управления работой АЦП и ОЗУ и стыковки их с ЭВМ. Однако для работы в реальных условиях физического эксперимента эта схема должна быть дополнена еще некоторыми узлами (рис. 1).

Перечислим принципы, которыми мы руководствовались при выборе структурной схемы, ее деталей и схемной реализации отдельных узлов. Это широкие функциональные возможности модулей; ориентация структурных решений на настройку и проверку прибора при помощи ЭВМ; стандартизация программного обеспечения и способов работы для всех моделей серии; высокая технологичность и воспроизводимость параметров при тиражировании.

Рассмотрим каждый из перечисленных принципов в отдельности.

Широкие функциональные возможности достигаются в первую очередь при высоких метрологических характеристиках прибора. В этой связи правильной представляется стратегия достижения в АЦП максимально возможных точностных характеристик при заранее выбранном быстродействии. Однако и при таком подходе чаще всего бывает трудно обеспечить необходимое амплитудное разрешение вследствие большого динамического диапазона регистрируемых сигналов. Поэтому обязательным узлом любого из перечисленных в табл. 1 блоков является входной масштабирующий усилитель, управляемый программно. В зависимости от ожидаемой амплитуды сигнала включается тот или иной диапазон.

Подобная ситуация, когда необходимо оперативно сменить шкалу, наблюдается и для оси времени. В ходе работы может потребоваться зарегистрировать с хорошим временным разрешением какой-либо участок сигнала или, наоборот, «обзорную картишку» всего процесса. Эти проблемы решаются с помощью встроенного многодиапазонного генератора интервалов дискретизации.

Особое внимание при разработке уделялось вопросам применения регистраторов в составе информационно-измерительных систем физиче-

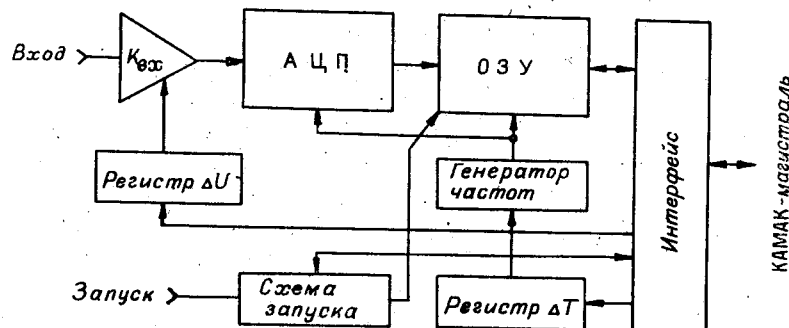


Рис. 1. Структурная схема регистраторов формы, работающих в реальном масштабе времени

Таблица 2

Параметр	Тип прибора	
	АЦП-850SK	АЦП-101SK
Количество каналов	4—2—1	4—2—1
Разрешающая способность	8 бит	10 бит
Интервал времени на один канал	50 нс — 2 мс	1 мкс — 2 мс
Объем памяти	1024 слова	4096 слов
Диапазоны входных сигналов	$\pm 1,28 - \pm 10$ В	$\pm 1,28 - \pm 10$ В

ских установок. Возможности регистратора как элемента таких систем определяются количеством и особенностями реализованных в нем режимов. Современные электрофизические установки, и в частности ускорительно-накопительные комплексы, имеют весьма сложные и насыщенные диаграммы работы, а обслуживающие эти установки ЭВМ — жесткую синхронизацию и ощутимую загрузку. В таких условиях регистраторы формы должны обеспечить не только стандартный режим «запуск — регистрация — передача в ЭВМ», но и, как показал опыт работы с этими приборами, различные модификации этого режима: блокировку импульса запуска, распределение данных в память по нескольким страницам, передачу информации в ЭВМ в режиме «Массив по Q» и т. п.

Требования многорежимности блока привели к тому, что управление работой всего прибора сконцентрировано в специальном регистре, каждый разряд которого определяет состояние какого-либо узла. Выбирая различные комбинации состояний этих узлов, можно получать всевозможные режимы работы блока. Такой подход оказался более эффективным, чем изменение режимов работы прибора с помощью последовательности команд блокировки-разблокировки, исполнения и т. п., и позволил легко включать прибор в системы со сложными диаграммами работы.

В подтверждение изложенному опишем назначение отдельных разрядов управляющего регистра.

Бит 1. «Обращение ЭВМ». Этот бит прерывает запись в память от АЦП, блокирует запуск и, если используется «Режим Single», то подготавливает триггер к очередному запуску. Бит 1 рекомендуется выставлять перед чтением памяти.

Бит 2. «Запрет L». Если в этот разряд записана 1, то флаговая логика запрещается и модуль становится пассивным.

Бит 3. «Режим Single». Режим автоблокировки по запускам, когда модуль воспринимает только первый импульс запуска, а все последующие игнорирует.

Бит 4. «Страничная запись». В этом режиме память распределяется на страницы объемом по 256 слов каждая. После импульса запуска записывается только одна (следующая) из страниц памяти.

Бит 5. «Самописец». В данном случае блок работает в режиме, при котором запись данных в ОЗУ происходит непрерывно, циклическим образом, до появления команды «Стоп», что позволяет зарегистрировать сигналы, предшествующие этой команде (предысторию процесса).

Еще один важный момент с точки зрения расширения функциональных возможностей — организация многоканальных измерений. Для многих экспериментов требуется одновременная регистрация формы нескольких сигналов при меньших требованиях к разрешающей способности по времени. Решить эту задачу достаточно просто можно с помощью встроенного в блок быстродействующего коммутатора аналоговых сигналов.

В табл. 2 приведены основные параметры многоканальных регистраторов.

Аппаратное усложнение входных узлов регистраторов в многоканальном варианте относительно невелико. Так, например, в блоке АЦП-850SK организация четырех каналов потребовала постановки трех дополнительных аттенюаторов, трех дифференциальных каскадов с управляемыми

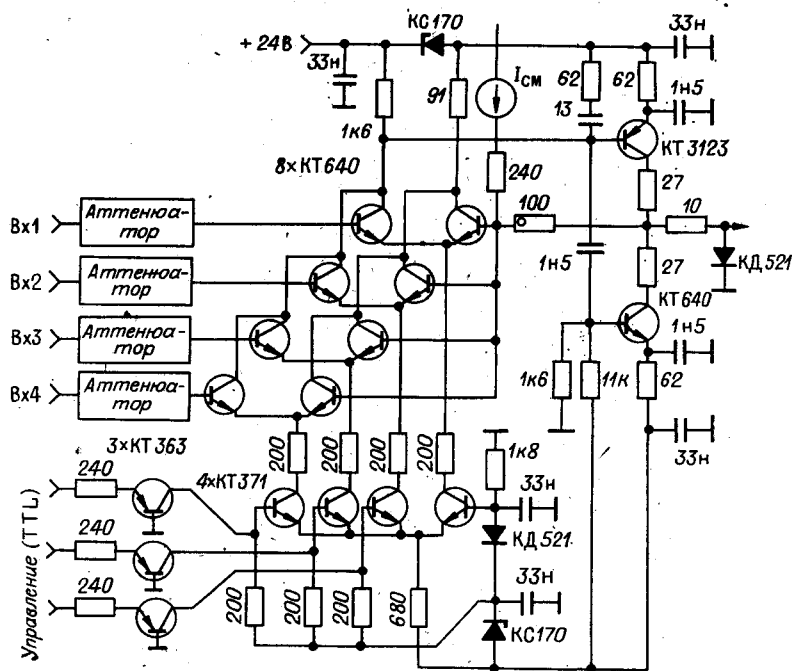


Рис. 2. Принципиальная схема 4-канального усилителя коммутатора для регистратора АЦП-850SK

генераторами тока и согласующих транзисторов (рис. 2). Сравнение с исходной схемой буферного усилителя для микросхемы 1107ПВ2 [12] демонстрирует экономичность такого подхода.

Перейдем к рассмотрению следующего из сформулированных выше принципов: ориентация структурных решений на настройку и проверку блока при помощи ЭВМ. В значительной мере необходимость проверки от ЭВМ вытекает из многорежимности и сложности всего устройства. Высказанное положение в основном касается структурных решений в цифровой части прибора, так как проверка аналогового тракта проводится для всего прибора целиком независимо от его внутренней организации.

Для построения цифровой части регистраторов была выбрана схема, показанная на рис. 3. Ее основа — внутренняя специализированная магистраль, или, говоря другими словами, внутренняя общая шина. КАМАК-шины *R* и *W* сводятся в двунаправленную шину, к которой единым образом подключаются все регистры, причем память со стороны общей шины выглядит так же, как обычный регистр. Входы регистров соединены с шиной непосредственно, а выходы — через микросхемы 555КП11, которые представляют собой счетверенные мультиплексоры 2 в 1 с тремя состояниями на выходе. При записи в регистр все мультиплексоры переведены в третье состояние и на шину подается информация с *W*-шины КАМАК, а при операциях чтения открывается один из мультиплексоров и шина подключается к *R*-шине КАМАК. Часть регистров сгруппирована по два (исходя из удобства разводки) и считывается общей микросхемой 555КП11. Таким образом сгруппированы регистр статуса и регистр типа, а также адресный счетчик и память.

Интерфейс собран с применением микросхем ППЗУ типов 155РЕ3 и 556РТ5, позволившим экономно решить задачу дешифрации команд, генерации ответов и управления общей шиной и многочисленными регистрами.

Блоки новой серии содержат регистры со следующими субадресами: *A*(0) — при команде с этим субадресом работа ведется с ОЗУ; дан-

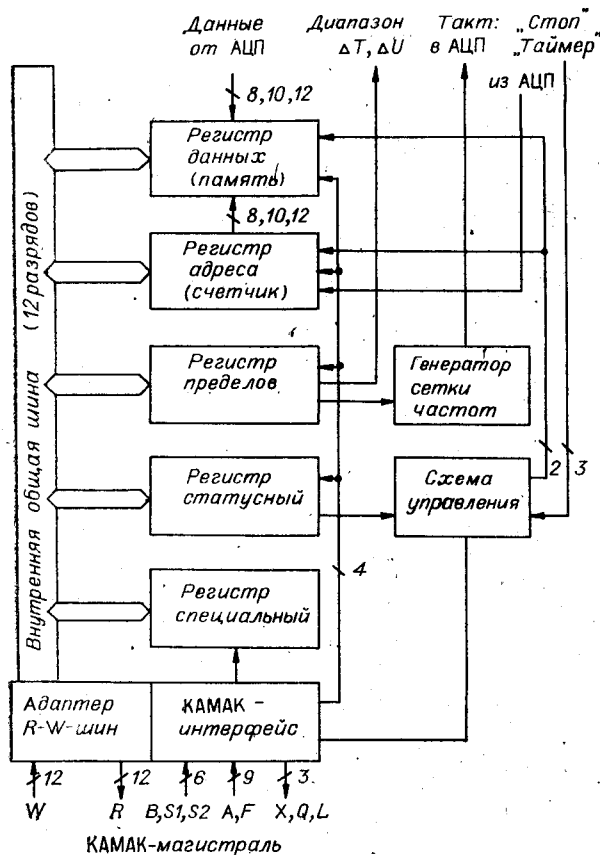


Рис. 3. Структурная схема цифровой части регистраторов 3-го поколения

ные могут быть как прочитаны из памяти, так и записаны в нее, причем при этих операциях адрес памяти автоматически инкрементируется;

A(1) — статусный регистр, определяющий режимы работы прибора;

A(2) — регистр адреса памяти (задает начальный адрес, с которого начинается чтение или запись в память от ЭВМ; может быть прочитан для определения текущего адреса);

A(3) — регистр пределов (определяет скорость записи отсчета в ОЗУ и диапазон входного сигнала по напряжению);

A(4) — служебный регистр (доступен только для чтения; в младшие 4 бита записан номер модели, а старшие содержат

дополнительную информацию, используемую при тестировании);

A(5) — фиктивный регистр запуска (запись слова по этому адресу инициирует внутренний импульс запуска);

A(6) — фиктивный регистр «Такт от ЭВМ» (если в регистре пределов записано соответствующее число, то по команде A(6)F(16) происходит запись в ОЗУ одного слова данных от АЦП).

Показанная на рис. 3 структурная схема обеспечивает для ЭВМ легкий доступ ко всем регистрам прибора, что позволяет осуществить его эффективное тестирование и настройку. Кроме того, имеется реальная возможность оперативного контроля за исправностью приборов во время работы, что особенно важно при проведении экспериментов на больших, территориально разнесенных установках или установках с ограниченным доступом.

Еще одним важным моментом при использовании приборов на больших установках являются вопросы стандартизации и сокращения объема программного обеспечения. Очень часто на одной и той же установке приходится работать с разными моделями цифровых регистраторов, и ощутимые неудобства (а иногда и серьезные ошибки) вызывают различия в формате слова данных и таблицах пределов. По этой причине при разработке новой серии регистраторов было принято решение стандартизовать таблицу пределов и формат слов, а также ввести регистр номера модели.

В аппаратуре нового поколения регистр данных (памяти) принят 12-разрядным. Приборы, имеющие меньшую разрядность, в младших битах при чтении выставляют нули, и поэтому в большинстве операций по обработке данных тип прибора не имеет значения.

В стандартизованной таблице пределов младшие 5 бит отведены для кодировки времени, причем прибор может использовать только часть таблицы; 3 бита отведены для кодировки амплитуды; 2 бита оставлены

резервными; 10-й бит включает дифференциальный вход на чувствительных диапазонах, а 12-й бит предназначен для контроля правильности установки предела, и поэтому программа может засылать пределы, не зная типа прибора.

Описанные меры по стандартизации дали возможность оперативно перекомпоновывать системы, делая их более быстрыми или более точными путем замены одних типов регистраторов на другие, причем без каких-либо изменений в программах.

И наконец, четвертый принцип, положенный в основу новой серии, — высокая технологичность и воспроизводимость параметров при изготовлении партий приборов. Основа успешного решения этих проблем лежит в грамотных схемотехнических решениях, выбранных с учетом технологического разброса параметров элементов, и тщательных испытаниях макетных образцов.

Для цифровых регистраторов как приборов, обладающих определенными точностными характеристиками в широкой полосе частот, весьма важны вопросы метрологического обеспечения. В задачах, возникающих в связи с этим перед разработчиком, можно выделить два этапа. На первом (в процессе разработки) необходимо измерить динамические характеристики отдельных узлов; на втором (при производстве) приходится контролировать и определять достигнутые параметры для прибора в целом.

Для решения этих задач созданы методики, специальная аппаратура и программное обеспечение. На первом этапе широко используется специальный стробоскопический АЦП, позволяющий с высокой точностью регистрировать переходные процессы в наносекундной области времен [14]. Параметры этого прибора следующие: разрешающая способность 12 бит; дифференциальная нелинейность не более $\pm 0,5$ мл. р.; стабильность масштаба не хуже $\pm 0,3$ мл. р.; стабильность «нуля» не хуже $\pm 0,5$ мл. р.; диапазон входных сигналов $\pm 2,56$ В; интервалы дискретизации от 0,2 до 20 нс; предельная частота синусоидального сигнала полного размаха: при ошибках 5; 1; 0,1% — 100; 30; 3 МГц соответственно; неопределенность привязки ± 40 нс; время установления с ошибками 1; 0,1% — 2 и 7 нс соответственно; объем ОЗУ 4096 слов; конструктивное исполнение — модуль КАМАК, ширина 2 М.

На рис. 4 в качестве примера показана «осциллограмма» импульса с фронтом 5 нс, а также в увеличенном по вертикали в 16 раз масштабе «полочка» этого импульса. Положение левого курсора соответствует началу импульса, положение правого — времени установления с ошибкой 0,5%.

Для второго этапа разработана единая для всех моделей система метрологического и поверочного обеспечения, включающая в себя: тесты общего функциони-

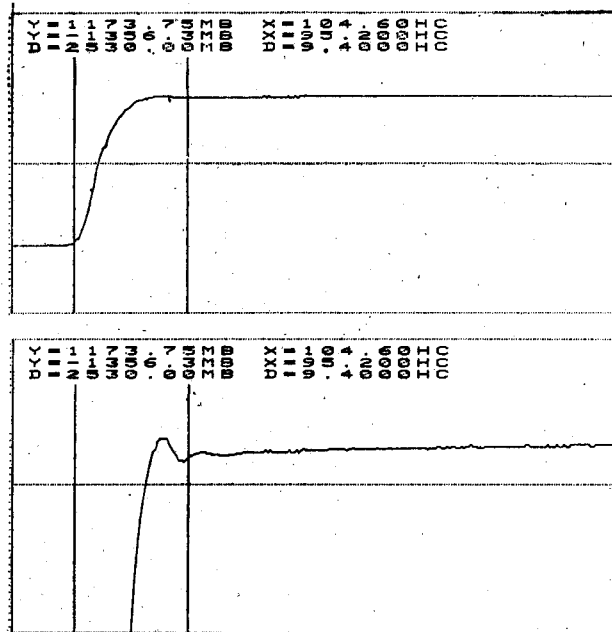


Рис. 4. Пример использования стробоскопического АЦП для измерения времени установления

рования и проверки памяти; контроль статических и динамических параметров.

подавляющее большинство проверочных операций автоматизировано и проводится на специальных стендах с управлением от ЭВМ.

Тесты общего функционирования в основном сводятся к большому количеству операций записи-чтения регистров и сравнению их состояний с заложенными в программе. Описанный выше подход при построении цифровой части позволяет провести всестороннюю ее проверку.

Отдельной программой контролируется исправность памяти. Для этого программа формирует массив псевдослучайных чисел, который записывается, а затем считывается из ОЗУ и сравнивается с исходным. Такая процедура многократно повторяется в различных температурных режимах, после чего делается вывод об исправности микросхем памяти. Тестирование памяти от ЭВМ, проводимое с темпом 1 слово/100 мкс, не позволяет сделать вывод о ее качественном функционировании при высокой скорости работы. Такой контроль осуществляется путем анализа отсчетов, получаемых при регистрации сигналов различной формы, и проводится в последнюю очередь для полностью настроенного прибора.

Статические характеристики регистраторов вследствие не очень высокой их разрядности (7—12 разрядов) проконтролировать достаточно просто. Эти измерения проводятся при помощи прецизионного ЦАП в пяти точках шкалы (0, ±0,475, ±0,99U_{max}) на каждом из амплитудных диапазонов в интервале температур 20—50°C. Таким способом контролируются положение и стабильность нуля и масштаба, а также интегральная нелинейность характеристики преобразования. При измерениях используется статистическая обработка отсчетов, дающая возможность с точностью до десятых долей кванта определить среднее значение результата. Изложенное иллюстрируется распечаткой, выдаваемой тестовой программой.

СКАНИРОВАНИЕ ПО ДИАПАЗОНАМ $\hat{t}=\pm 0,4$						
ОШИБКА В КВАНТАХ НА УРОВНЯХ						
ШКАЛА	-0.95	-0.475	0	+0.475	+0.95	
.0800	.584	-.23	-.03	.173	1.36	ER.M=.772656
.1600	1.53	-.23	-.03	.169	.377	ER.M=-1.1492
.3200	.569	-.23	-.03	.169	.373	ER.M=-.19609
.6400	.569	-.23	-.03	.169	.369	ER.M=-.20000
1.280	-.43	-1.2	-.85	.110	.369	ER.M=.800000
2.560	.569	-.23	-.03	.169	.369	ER.M=-.20000

Измерение дифференциальной нелинейности как в статике, так и в динамике проводится по одной и той же методике [15]. Для этого на вход прибора подается и регистрируется синусоидальный сигнал с частотой, не кратной частоте преобразования. Затем количество появлений отдельных значений кодов подсчитывается и откладывается по шкале Y против соответствующего значения кода. При многократном повторении этой операции будет получена кривая, отражающая вероятность появления каждого значения при случайном взятии отсчетов (рис. 5). Если величина шага квантования изменяется от кода к коду, то и количество появлений этих кодов меняется соответствующим образом и получаемая кривая однозначно связана с дифференциальной нелинейностью на данной частоте.

Как показано в [18], для идеального АЦП эта кривая имеет вид

$$P(U_{вх}) = \frac{K}{\sqrt{A^2 - U_{вх}^2}},$$

где A — амплитуда сигнала; K — нормировочный коэффициент.

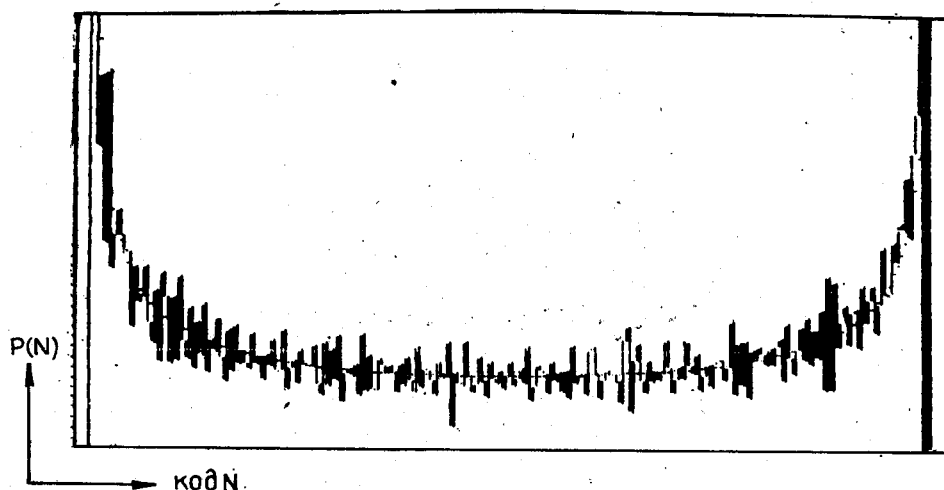


Рис. 5. Кривая, отражающая вероятность появления значений кодов при синусоидальном сигнале

Нормируя экспериментальную кривую на кривую $P(U_{вх})$, получим график дифференциальной нелинейности нашего преобразователя на данной частоте. Очевидно, что, работая с частотой в единицы килогерц, измерим статическую дифференциальную нелинейность, а подавая на вход высокую частоту, — динамическую. На рис. 6 показаны полученные таким способом кривые для двух частот входного сигнала.

Важным показателем работы прибора является спад амплитудно-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот. Этот показатель отражает в основном правильность настройки входных аналоговых узлов регистратора. Для проведения подобных измерений в нашем случае используются обычные промышленные генераторы, но их амплитуда на разных частотах контролируется с необходимой степенью точности с помощью стробоскопического АЦП. Измеренные таким образом АЧХ для блоков АЦП-104S и АЦП-850S показаны на рис. 7.

Стробоскопический АЦП может применяться и при окончательной проверке регистраторов, когда на вход исследуемого прибора подается какой-либо периодический сигнал и регистрируется его форма, после чего результат сравнивается с результатом оцифровки этого сигнала в «идеальном» регистраторе. По разности отсчетов делается вывод о величине ошибки. Такая методика похожа на методику, описанную в [16], с той разницей, что обладает лучшей точностью и более широкими возможностями, обусловленными применением стробоскопического АЦП и обработкой данных в ЭВМ.

Рассмотрим способ измерения еще одного важного параметра, характеризующего качество работы регистратора в динамике, — апертурной дрожи [17].

При этих измерениях процесс преобразования привязан к фазе быстротеменяющегося сигнала и выполняется многократно при одном и том же его значении. При проверке идеального преобразователя одно и то же значение кода должно наблюдаться столько раз, сколько было сделано измерений. Реально из-за шумов различной природы появляется некоторое количество соседних значений кодов.

Очевидно, что аппаратура, осуществляющая синхронизацию, должна обладать меньшей величиной неопределенности привязки, чемверяемый прибор. В данном случае использовалось свойство стробоскопического АЦП формировать временной интервал необходимой длительности, привязанный к фазе входного сигнала. Качество привязки и стабильность этого интервала специально исследовались и дали значение неопределенности в пределах ± 40 пс на частоте 10 МГц.

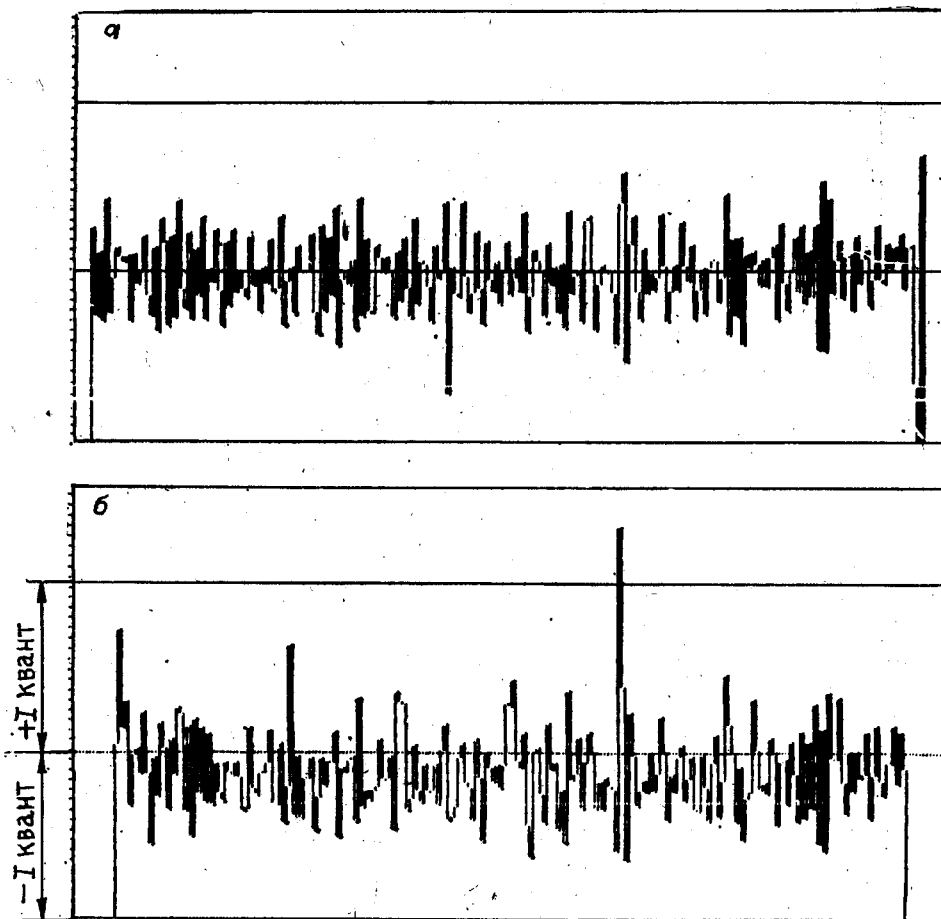


Рис. 6. Дифференциальная нелинейность регистратора АЦП-850S при частоте сигнала 5 кГц (а) и 5 МГц (б)

Синусоидальный сигнал нужной частоты подавался одновременно на исследуемый регистратор и на стробоскопический АЦП. Последний формировал команду на преобразование с такой задержкой, чтобы отсчеты производились вблизи точек максимальной производной входного сигнала. Результаты отсчетов исследуемого прибора представлялись в виде гистограммы (рис. 8), на которой по оси X отложены значения кодов, а по оси Y — количество их появлений. «Размывание» гистограммы 2 по сравнению с гистограммой 1 происходит за счет временных флуктуаций

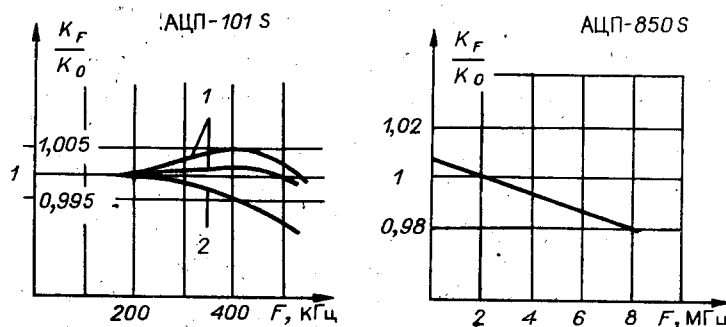
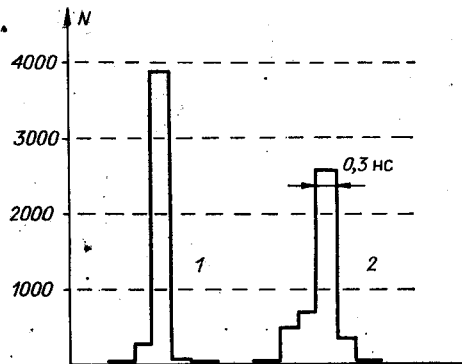


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики приборов АЦП-101S и АЦП-850S:

1 — основной усилитель; 2 — усилитель. « $\times 16$ »

Рис. 8. Гистограммы, демонстрирующие величину апертурной неопределенности; площадь каждой гистограммы 4096 отсчетов:

1 — статика, 2 — $F_{ВХ} = 1$ МГц



момента отсчета и отражает величину апертурной неопределенности.

Остановимся на схемотехнических решениях наиболее сложных узлов описываемых приборов. Рассмотрение начнем с устройства выборки-хранения (УВХ), применяемого в АЦП-101S. Этот регистратор построен на основе интегрального преобразователя К1108ПВ1, представляющего собой 10-разрядный АЦП поразрядного уравнивания с временем преобразования 850—900 нс. Схема УВХ показана на рис. 9. Операционный усилитель (ОУ) однокаскадный с обращенным каскодным транзистором T_4 и генератором тока T_5 в нагрузке. Одновременно T_4 и T_5 являются управляемыми элементами ключа. Управляющие элементы ключа — транзисторы T_6 и T_7 . Совмещение функции усилителя и аналогового ключа на одних и тех же элементах позволило заметно упростить схему. Обратная связь замкнута, и УВХ находится в режиме выборки, если на базу T_6 подано напряжение 0 В. При подаче управляющего

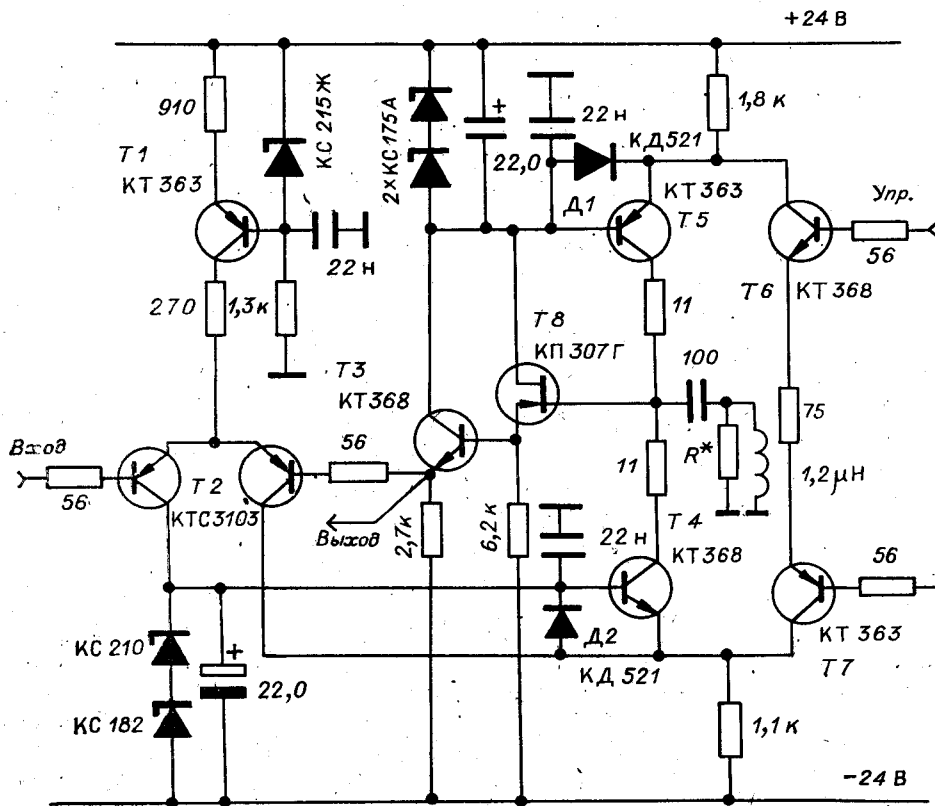


Рис. 9. Схема УВХ регистратора АЦП-101S

напряжения 3—3,5 В через T_6 , T_7 начинает протекать ток ~ 20 мА. После закрывания T_4 и T_5 излишки тока текут через D_1 и D_2 .

В первую очередь рассмотрим работу УВХ в режиме выборки. В этом случае к ОУ предъявляются два требования. Первое — время установления напряжения на выходе УВХ при полном скачке входного сигнала не должно превышать 130 нс. Это время в активных УВХ складывается из двух составляющих: времени заряда запоминающей емкости током выходного каскада, когда ОУ находится в нелинейном режиме, и некоторого времени «успокоения», когда разность между входом и выходом невелика и ОУ работает в линейном режиме. Для получения удовлетворительной переходной характеристики запоминающая емкость 130 пФ должна заряжаться током 8—10 мА, а ОУ иметь частоту единичного усиления 100 МГц.

Второе требование к УВХ в режиме выборки — слежение с заданной точностью за изменяющимся входным сигналом. Для этого АЧХ разомкнутого усилителя должна иметь коэффициент усиления на нулевой частоте не менее 1000 и вполне определенный вид в рабочем диапазоне частот.

Можно показать [13, 20], в предположении линейной работы УВХ и представлении его АЧХ как звена первого порядка, что в «активных» УВХ связь между частотой отслеживаемого сигнала F_{\max} , относительной ошибкой δ и параметрами АЧХ разомкнутого усилителя определяется выражением

$$F_{\max} \leq F_1 \sqrt{2\delta},$$

где F_1 — частота единичного усиления ОУ.

Если вклад статической и динамической ошибок принять равным по $0,5 \cdot 10^{-3}$, то УВХ, выполненное по описываемой схеме, позволяет отслеживать сигналы полной амплитуды до частот 2,5 МГц.

Отметим еще одну особенность схемы УВХ. Коррекция ОУ в области частот 50 МГц и выше требует последовательного включения с $C_{\text{зап}}$ резистора 20—40 Ом. Однако резистор с номиналом более 5 Ом приводит к динамической ошибке запоминания, вызванной прекращением протекания тока через резистор при переходе к хранению. Для устранения этого эффекта служит индуктивность 1,5 мкГн, роль которой состоит в том, что на рабочих частотах (до 500 кГц) она замыкает резистор, а на высоких частотах (свыше 80 МГц) никак не сказывается [10].

Приведем характеристики, определяемые ключом. Величина паразитного «наброса» на $C_{\text{зап}}$ 3—5 мВ; температурный дрейф «наброса» 90 мкВ/°С; время выключения ключа 1 нс; спад выходного напряжения в режиме хранения 20 мкВ/мкс; пролезание входного напряжения в режиме хранения не более $10^{-3} U_{\text{вх}}$ на частоте 5 МГц.

Время установления УВХ при размахе входного сигнала от $-1,3$ до $+1,3$ В не превышает 130 нс, а спад АЧХ на величину $0,5 \cdot 10^{-3}$ наступает на частотах $\sim 2,5$ МГц.

Определенный интерес представляет схема широкополосного масштабирующего усилителя, применяемого в АЦП-710S. Этот усилитель должен иметь $K = 8$, статические характеристики, соответствующие 7 бит АЦП, время установления ~ 10 нс и неравномерность амплитудно-частотной характеристики в полосе частот 40 МГц 1%. В принципе возможно получение таких параметров в усилителе, не охваченном общей обратной связью. Однако количество подстроечных элементов в данном случае достигает 4—5 (коэффициент усиления, смещение «0», переходная характеристика в области быстрых и медленных времен), а настройка становится индивидуальной и весьма трудоемкой. Рассматриваемый усилитель построен на основе широкополосного операционного усилителя с параллельным медленным каналом. Его принципиальная схема приведена на рис. 10.

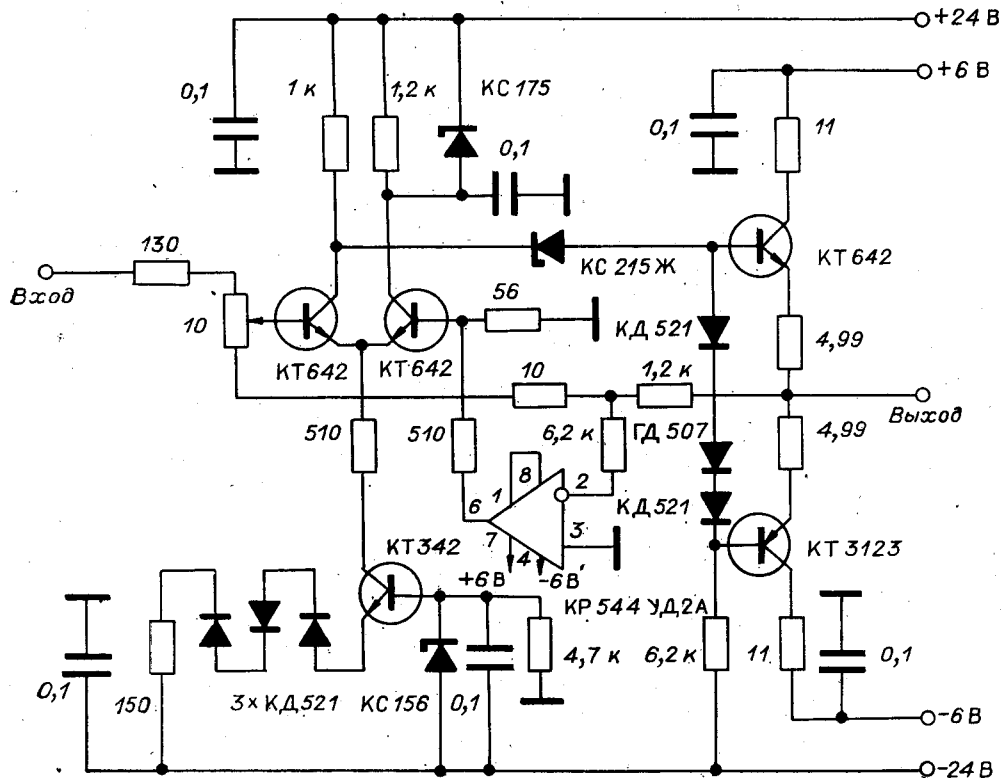


Рис. 10. Принципиальная схема входного усилителя для регистратора АЦП-710S

Схему усилителя можно разбить на два узла: быстрый усилитель, обеспечивающий высокие динамические характеристики (такие как скорость роста напряжения на выходе, частота единичного усиления), и сравнительно медленный канал усиления, обеспечивающий хорошие точностные показатели устройства в статике и на медленно меняющихся сигналах. Подобные конфигурации усилителей применялись и ранее, однако при этом всегда оказывалось необходимым сопряжение амплитудно-частотных характеристик каналов усиления в области высоких частот [19].

Пусть F_{s1} — частота единичного усиления медленного канала. Амплитудно-частотные характеристики каналов усиления будут сопряженными, если спад АЧХ быстрого усилителя начинается на частоте F_{s1} . При невыполнении этого условия переходная характеристика всего устройства искажается релаксационными процессами.

При использовании в качестве медленного канала серийного операционного усилителя, полоса пропускания которого ограничена, требование согласования АЧХ каналов накладывает принципиальное ограничение на быстродействие всего устройства, так как оно может быть достигнуто только путем уменьшения частоты среза АЧХ быстрого канала.

Предложенное решение позволяет вообще обойти необходимость согласования АЧХ каналов усиления и тем самым получить возможность построения достаточно точного усилителя с быстродействием, определяемым только свойствами транзисторов в быстром канале усиления. Для рассмотрения принципа действия предложенного устройства обратимся к его схеме (см. рис. 10). В целях улучшения динамических характеристик быстрый усилитель выполнен на дискретных элементах и имеет лишь один каскад, частота единичного усиления которого составляет 1,5 ГГц. В таком каскаде невозможно получение достаточно большого статического коэффициента усиления, в то время как для медленного канала он составляет 20 000.

Предложено с учетом этого охватить усилители отрицательной обратной связью с разными для быстрого и медленного каналов коэффициентами β_F и β_S . При этом должно выполняться условие

$$K_{oF}/(1 + K_{oF}\beta_F) = K_{oS}/(1 + K_{oS}\beta_S),$$

где K_{oF} и K_{oS} — коэффициенты усиления быстрого и медленного каналов соответственно. Такое условие согласования достаточно для того, чтобы искажения переходной характеристики отсутствовали, и позволяет полностью реализовать широкополосность быстрого канала усиления.

Несомненно, в этом случае предъявляются более жесткие требования к схемотехнике быстрого канала усиления, и в частности к стабильности его статического коэффициента усиления, которая достигается введением в схему усилителя узлов, компенсирующих изменение его электрических характеристик. Так, в состав генератора тока во входном каскаде входят три диода КД521, которые в сочетании с рассчитанным номиналом резистора в эмиттере транзистора КТ342 компенсируют дрейф сопротивления эмиттерных переходов дифференциальной пары и коэффициента передачи по току и тем самым обеспечивают независимость от температуры статического коэффициента усиления быстрого канала.

Относительно «быстрые» дрейфы широкополосного усилителя из-за саморазогрева транзисторов входного каскада при изменении входного сигнала минимизированы благодаря выравниванию скачков мощностей этих транзисторов (стабилитроны КС175, КС215).

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипов В. К. Масштабно-временное преобразование коротких сигналов при помощи электронно-лучевых трубок памяти.— М.: Энергия, 1968.
2. Денбовецкий С. В., Денисов А. Ф., Орлов И. И. и др. Анализаторы импульсных сигналов.— Киев: Техника, 1984.
3. Рехин Е. И., Глушковский М. Е. Измерение однократных сигналов в современной ядерной физике.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. A One Gigasample per Second Transien Recorder.— IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 4, p. 4443.
5. Сазанский В. Я., Шейнгузихт А. А. Регистратор однократных импульсных сигналов АФИ-16.— Новосибирск, 1979. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 79—37).
6. Батраков А. М., Козак В. Р., Чуканов В. В. Регистратор формы импульсных сигналов «Магнолия-06».— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 85—30).
7. Выставка научного приборостроения «Сибирский прибор-76»: Аннотированный каталог приборов и разработок.— Новосибирск: Наука, 1978.
8. Батраков А. М., Козак В. Р., Нифонтов В. И. и др. Приборы для цифровой регистрации однократных импульсных сигналов.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Материалы Всесоюз. конф. Новосибирск: ИАПЭ СО АН СССР, 1977.
9. Батраков А. М., Козак В. Р., Нифонтов В. И. Регистратор однократных импульсных сигналов АЦП-8100.— Новосибирск, 1979. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 79—40).
10. Батраков А. М., Козак В. Р. АЦП для цифровой регистрации однократных импульсных сигналов.— Автометрия, 1978, № 4.
11. Нифонтов В. И., Хильченко А. Д. Регистратор однократных импульсных сигналов «Импульс-А».— Новосибирск, 1979. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 79—39).
12. Батраков А. М., Козак В. Р. Регистраторы формы импульсных сигналов серии «S». АЦП-850S.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 85—10).
13. Батраков А. М., Козак В. Р. Регистраторы формы импульсных сигналов серии «S». АЦП-101S.— Новосибирск, 1985. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 85—9).
14. Нифонтов А. В. Стробоскопический АЦП для настройки и тестирования радиосхем: Материалы Всесоюз. науч.-студ. конф. Физика.— Новосибирск: НГУ, 1984.
15. Мартин Н., Мьюто А. Динамический контроль аналого-цифровых преобразователей.— Электроника, 1982, № 4.
16. Беломестных В. А., Вьюхин В. Н., Касперович А. Н. и др. Об одном способе экспериментального определения динамических свойств быстродействующих АЦП.— Автометрия, 1976, № 5.

17. Бахтияров Г. Д., Дикий С. М. Аналого-цифровые преобразователи.— Зарубеж. радиоэлектроника, 1975, № 1.
18. 5180 A Waveform recoder.— Hewlett-Packard J., November 1982.
19. Полонников Д. Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
20. Касперович А. Н., Литвинов Н. В. К вопросу о погрешности устройств выборки и запоминания.— Автометрия, 1974, № 5.

Поступила в редакцию 3 февраля 1986 г.

УДК 681.142.621

Ю. И. ГОЛУБЕНКО, Э. А. КУПЕР, А. В. ЛЕДЕНЕВ, А. В. СМЕРНОВ
(Новосибирск)

АППАРАТУРА ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В системах автоматизированного управления электрофизических установок широко применяются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) различной точности и быстродействия. В зависимости от способа преобразования аналоговой величины в цифровой эквивалент АЦП делятся на два широких класса: приборы для измерения мгновенного значения и приборы для измерения среднего значения за определенный интервал времени. Последние принято называть интегрирующими АЦП (ИАЦП). Они обладают высокой помехозащищенностью, точностью, решающей способностью (близкой к теоретическому пределу) и экономичностью в реализации. Это обеспечивает преимущественное использование данного класса приборов в многоканальных измерительных системах.

Широкое распространение получил метод двойного интегрирования [1], достоинствами которого являются независимость результата преобразования от номиналов резистора и конденсатора интегратора, а также простота схемной реализации.

Отметим факторы, ограничивающие разрядность и точность преобразования при применении этого метода: а) шум усилителей интегратора и нуля-органа; б) поляризация (абсорбция) интегрирующего конденсатора.

Приведем формулу для вычисления длины шкалы преобразования, полученную в предположении, что шиковое значение шума равно одному кванту преобразования:

$$N = \sqrt[3]{\frac{\pi U^2 T_1}{36 e_{\text{ш}}^2}} \quad (1)$$

Здесь U — максимальное выходное напряжение интегратора; T_1 — время интегрирования входного сигнала (максимальное время интегрирования опорного напряжения равно $0,5T_1$); $e_{\text{ш}}$ — суммарная спектральная плотность напряжения шума операционных усилителей интегратора и нуля-органа.

Влияние поляризации выражается в нелинейности преобразования и в наличии погрешности, обусловленной «памятью» от предыдущего измерения. Аппроксимируя элементы поляризации одной RC -цепочкой, можно получить формулы для вычисления этих составляющих погрешности (соотношения (2) и (3) соответственно). Заметим, что наибольшая погрешность от «памяти» будет при первом измерении после смены